

Analyse de sensibilité du modèle CEQÉROSS Sensitivity analysis of the CEQÉROSS model

M. Duchemin et M. Lachance

Volume 15, numéro 4, 2002

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705481ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705481ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Duchemin, M. & Lachance, M. (2002). Analyse de sensibilité du modèle CEQÉROSS. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 15(4), 789–807.
<https://doi.org/10.7202/705481ar>

Résumé de l'article

L'analyse de sensibilité constitue une étape importante dans le développement et la mise en place d'un modèle de simulation. Cette analyse de sensibilité du modèle CEQÉROSS effectuée sur un petit bassin versant agricole du Québec (Canada) montre que la dimension du maillage utilisé pour découper le bassin versant de Lennoxville en éléments de calcul exerce une influence directe, mais modérée, sur la charge sédimentaire transportée à l'exutoire. Les paramètres de calage associés à l'érosivité des précipitations et les variables d'entrée décrivant la topographie influencent considérablement les résultats de la simulation pour la période considérée et, de ce fait, nécessitent une plus grande attention lors des étapes de préparation des données et de calage du modèle. La forme linéaire de l'équation de production de sédiments en rivière exerce un rôle majeur sur les charges totales annuelles simulées. L'importance relative des paramètres associés à la granulométrie des sédiments transportés en rivière indique que la capacité du cours d'eau à transporter les particules grossières limite la charge totale annuelle évacuée à l'exutoire du bassin versant de Lennoxville pendant la période d'étude. Ces résultats doivent cependant être confrontés à d'autres analyses de sensibilité afin de décider des modifications éventuelles à apporter aux équations du modèle.

Analyse de sensibilité du modèle CEQÉROSS

Sensitivity analysis of the CEQÉROSS model

M. DUCHEMIN¹*, M. LACHANCE²

Reçu le 15 août 2002, accepté le 2 octobre 2002**.

SUMMARY

Sensitivity analysis is a significant step in the development of computer models used to simulate soil erosion and nonpoint source pollution because it allows to evaluate objectively the importance of changes which occur in the response of a model (output) following changes brought in the parameters and variables of the input data. The objective of this study consists of using sensitivity analysis in order to verify the influence of calibration parameters, input variables and the size of the simulation units (i.e. grid squares) on the annual suspended sediment load (net erosion) of a small agricultural watershed (78 ha) located in Lennoxville, province of Quebec (Canada) for the period October 1991 to September 1992. This sensitivity analysis uses the results of an hydro-sedimentological simulation carried out with the CEQÉROSS computer model (DUCHEMIN *et al.*, 2001). The sensitivity analysis takes into account calibration parameters and input variables selected for their ability to influence soil and river erosion and sediment transport (*table 2*). The analytical procedure consists in using a sensitivity index to quantify the response of the model to extreme (minimum and maximum) values of parameters and variables. The principal results of the sensitivity analysis are presented in *figure 3*.

The sensitivity analysis of the annual load of suspended sediments indicate that the size of the grid squares used to segment the watershed (i.e. RESOLUTION) had a direct but rather weak influence on net erosion. The results indicate that the erosivity calibration parameters EXPRP and COEFAM, the

1. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), 2700 rue Einstein, Sainte-Foy, Québec, Canada, G1P 3W8.

2. Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau-Terre-Environnement (INRS-ETE), Université du Québec, 2800 rue Einstein, CP 7500 Sainte-Foy, Québec, Canada, G1V 4C7.

* Correspondance. E-mail : Marc.Duchemin@irda.qc.ca

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 juillet 2003.

transport capacity parameters FCTS and PSDS and the topographic input variable PENTD associated to soil erosion, have a considerable influence on the annual load of suspended sediments and, therefore require a greater attention to be brought during the steps of data preparation and model calibration. The results indicate also that calibration parameters FPUS1, FPUS2, FSSRIV1 and FSSRIV2 associated to river erosion are the most influential. The linear form of the river sediment production equation contribute to increase the influence of these parameters on the output of the simulation. The fraction of fine sediments (POSS1) transported in the river plays an insignificant role on the annual load of suspended sediments simulated by the CEQÉROSS model. The annual suspended sediment load varies conversely to the increase of coarse sediments (POSS4). The river capacity to transport the coarse grained particles hinders the annual suspended load evacuated from the Lennoxville watershed. The results of the sensitivity analysis must be confronted with additional sensitivity analysis (i.e. larger watershed, longer period of simulation) using the CEQÉROSS model in order to decide if modifications should be undertaken to the model equations.

Key-words: *erosion, sediments, watershed, sensitivity analysis, CEQÉROSS.*

RÉSUMÉ

L'analyse de sensibilité constitue une étape importante dans le développement et la mise en place d'un modèle de simulation. Cette analyse de sensibilité du modèle CEQÉROSS effectuée sur un petit bassin versant agricole du Québec (Canada) montre que la dimension du maillage utilisé pour découper le bassin versant de Lennoxville en éléments de calcul exerce une influence directe, mais modérée, sur la charge sédimentaire transportée à l'exutoire. Les paramètres de calage associés à l'érosivité des précipitations et les variables d'entrée décrivant la topographie influencent considérablement les résultats de la simulation pour la période considérée et, de ce fait, nécessitent une plus grande attention lors des étapes de préparation des données et de calage du modèle. La forme linéaire de l'équation de production de sédiments en rivière exerce un rôle majeur sur les charges totales annuelles simulées. L'importance relative des paramètres associés à la granulométrie des sédiments transportés en rivière indique que la capacité du cours d'eau à transporter les particules grossières limite la charge totale annuelle évacuée à l'exutoire du bassin versant de Lennoxville pendant la période d'étude. Ces résultats doivent cependant être confrontés à d'autres analyses de sensibilité afin de décider des modifications éventuelles à apporter aux équations du modèle.

Mots clés : *érosion, sédiments, bassin versant, analyse de sensibilité, CEQÉROSS.*

1 – INTRODUCTION

Les modèles informatiques utilisés pour simuler l'érosion hydrique et le transport des sédiments jouent un rôle important dans la gestion agroenvironnementale des bassins versants car ils permettent d'évaluer l'impact des activités anthropiques sur la qualité de l'eau (GANGBAZO *et al.*, 1994 ; VILLENEUVE *et al.*, 1998). Ces modèles sont utilisés pour évaluer l'incidence environnementale de certaines pratiques agricoles. Modèle et sensibilité vont de pair : cette der-

nière influençant directement le choix d'un modèle, sa qualité et particulièrement son utilisation. L'analyse de sensibilité constitue une étape déterminante dans le développement et la mise en place des modèles puisqu'elle permet d'évaluer les changements survenus dans la réponse d'un modèle suite à des changements apportés dans ses paramètres et variables d'entrée. Ce type d'analyse vise à étudier comment la variation du rendement d'un modèle peut être répartie entre différentes sources de variation (paramètres, variables).

L'analyse de sensibilité cherche à établir comment le modèle dépend de l'information introduite, de sa structure et des hypothèses faites pour l'établir. Cette information peut être de valeur inestimable, car différentes incertitudes agissent différemment sur la fiabilité, la robustesse et l'efficacité du modèle. La fiabilité des résultats fournis par les modèles est fonction de la justesse et de la représentativité des paramètres utilisés. L'analyse de sensibilité paramétrique consiste à quantifier les effets de la variation d'une variable d'entrée sur les résultats d'une simulation (MCCUEN et SNYDER, 1986). À l'aide de cette analyse, il est possible d'évaluer l'impact de l'imprécision des paramètres d'entrée sur les résultats des modèles. Cette imprécision est souvent liée à la variabilité spatiale de ces paramètres ainsi qu'aux méthodes de mesure de ces paramètres (ROBERT *et al.*, 1992).

L'analyse de sensibilité permet de juger de la pertinence des paramètres qui composent les modèles d'érosion car les relations utilisées pour simuler les processus en jeu possèdent plusieurs incertitudes. Cette analyse permet d'évaluer la robustesse d'un modèle en examinant comment les résultats de l'analyse varient lorsque la valeur des variables clés est modifiée dans un intervalle déterminé (NEARING *et al.*, 1990). MEIER *et al.* (1971) soulignent que l'analyse de sensibilité est souvent utilisée pour évaluer l'importance relative des efforts à fournir pour recueillir et préparer les données nécessaires au fonctionnement d'un modèle. Ce type d'analyse permet également d'étudier la réponse d'un modèle à l'introduction d'erreurs dans les entrées. Dans l'ensemble, l'analyse de sensibilité est utilisée pour augmenter la confiance des modèles et ses prévisions, en fournissant une meilleure compréhension de la façon dont les sorties réagissent aux changements des entrées.

L'objectif de cette étude consiste à utiliser l'analyse de sensibilité de façon à vérifier l'influence des paramètres de calage et des variables d'entrée du modèle CEQÉROSS (DUCHEMIN *et al.*, 2001) sur l'estimation de la charge totale annuelle de sédiments (érosion nette) transportés à l'exutoire d'un bassin versant agricole.

2 – MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Modèle CEQÉROSS

Le modèle CEQÉROSS constitue le cœur d'une approche géomatique qui vise à simuler, en continu, l'érosion hydrique et le transport des sédiments à l'échelle des bassins versants (DUCHEMIN *et al.*, 2001). Cette approche implique l'utilisation conjointe du système d'information géographique IDRISI (EASTMAN,

1997), du modèle hydrologique CEQUEAU (MORIN *et al.*, 1995) et du modèle d'érosion hydrique MODÉROSS (DUCHEMIN *et al.*, 2001). La figure 1 illustre la composition de cette approche géomatique de simulation.

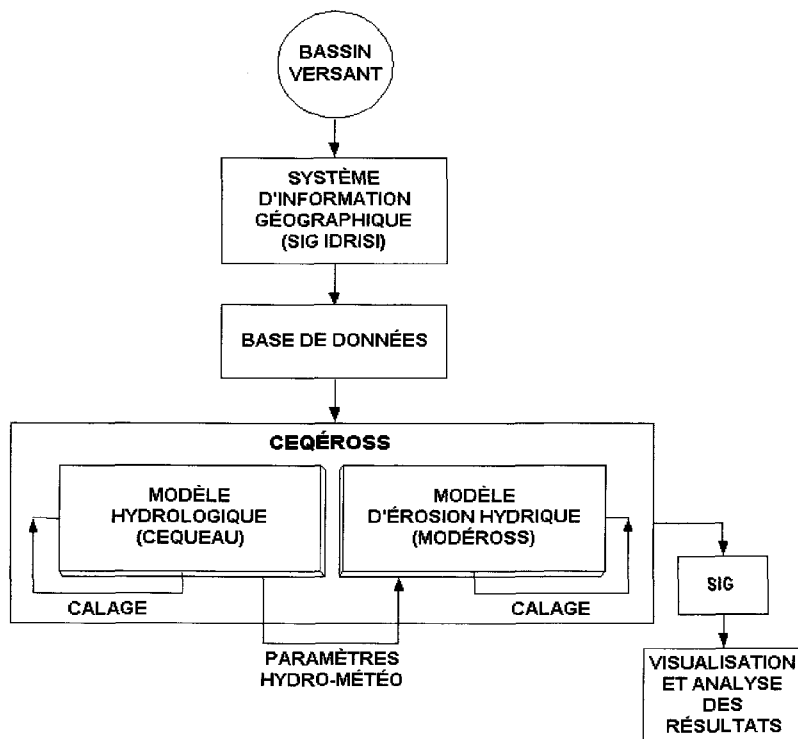


Figure 1 Composantes de l'approche géomatique de simulation.
Composition of the geomatic simulation approach.

Une modélisation conceptuelle, à distribution spatiale, a été choisie pour reproduire les processus d'érosion et de sédimentation à l'échelle du bassin versant. Une recherche d'équations empiriques a été effectuée parmi les modèles d'érosion hydrique existants. En pratique, et considérant les récents progrès attribuables au modèle d'érosion RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation* ; RENARD *et al.*, 1997), il semble que l'emploi des facteurs de l'équation universelle de perte de sol USLE (*Universal Soil Loss Equation* ; WISCHMEIER et SMITH, 1978) demeure une stratégie acceptable pour modéliser l'érosion hydrique des sols. Les principaux facteurs qui affectent l'érosion hydrique sont inclus dans l'USLE/RUSLE :

$$A = R K L S C P \quad (1)$$

où A représente le taux potentiel d'érosion hydrique ($t \cdot ha^{-1}$), R représente le facteur d'érosivité des précipitations ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$), K représente le facteur d'érodabilité des sols ($t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$), L représente le facteur de longueur de pente, S représente le facteur d'inclinaison de pente, C représente le facteur de la couverture végétale et P représente le facteur

des pratiques de conservation du sol. Le module d'érosion de CEQÉROSS a été élaboré en s'inspirant de l'USLE/RUSLE et en y ajoutant certaines équations issues d'autres modèles (RICHARDSON *et al.*, 1983 ; FINKNER *et al.*, 1989 ; YOUNG *et al.*, 1990). L'appendice 1 présente les principales équations du modèle CEQÉROSS.

CEQÉROSS emprunte le découpage du bassin versant en carreaux entiers de CEQUEAU (MORIN *et al.*, 1995) et considère également ses fonctions de production et de transfert d'eau et de sédiments sur les carreaux entiers (i.e. éléments de calcul). Une application de CEQÉROSS implique deux simulations successives afin de reproduire, chaque jour, les processus hydrologiques, d'érosion et de sédimentation sur chaque carreau d'un bassin versant. Ces simulations s'accompagnent d'étapes de calage qui visent à optimiser un ensemble de paramètres de façon à reproduire les données journalières de débits, de concentrations et de charges de sédiments en suspension observées à l'exutoire d'un bassin versant.

2.2 Bassin versant étudié

L'analyse de sensibilité porte sur les résultats d'une simulation hydrosédimentologique effectuée sur un petit bassin versant agricole de 78 ha situé à Lennoxville, au Québec (DUCHEMIN *et al.*, 2001). Le bassin versant de Lennoxville se localise à environ 5 km au sud-est de la ville de Sherbrooke. La période considérée pour l'analyse de sensibilité correspond à la période de calage du modèle CEQÉROSS, soit du 1^{er} octobre 1991 au 30 septembre 1992. Une température moyenne de 4,0 °C a été enregistrée au cours de cette période. Cette température s'est avérée plus froide que la normale climatique de 5,3 °C établie pour la période 1961-1990 (Environnement Canada, 1993). L'année hydrologique 1991-1992 a reçu 679,6 mm de pluie et 164,6 mm de neige (équivalent en eau) comparativement à 794,5 mm de pluie et 251,7 mm de neige pour la normale climatique de 1961-1990. Les quantités totales d'eau reçue pour l'année hydrologique 1991-1992 présentaient donc un déficit de 19,3 % par rapport à la normale climatique de 1961-1990. La neige couvre le bassin versant entre les mois de novembre et avril.

Les altitudes du bassin versant varient graduellement de 150 m à l'aval à 230 m à l'amont. La pente moyenne atteint environ 7 %. Les séries de sol Coaticook (loam limoneux) et Sheldon (loam sableux) couvrent 75 % du bassin versant. Un recensement des activités agricoles sur le bassin versant pendant la période d'octobre 1991 à septembre 1992 révèle que les cultures fourragères occupaient 36,3 % du bassin versant alors que les cultures en maïs et les pâturages occupaient, respectivement, 22,8 % et 20,0 % du bassin versant. De façon générale, les combinaisons d'occupations du sol, de topographie et de textures du sol, et leur localisation sur le bassin versant, offraient une bonne protection contre l'érosion hydrique et le transport des sédiments. Celui-ci s'avère particulièrement important au printemps, lors de fonte des neiges, où environ 60 à 70 % de la charge sédimentaire annuelle est évacuée du bassin versant en quelques jours.

2.3 Analyse de sensibilité

La procédure analytique consiste à utiliser un indice de sensibilité afin de quantifier la réponse du modèle CEQÉROSS aux valeurs extrêmes (minimum et maximum) d'un ensemble de paramètres de calage et de variables d'entrée. L'analyse de sensibilité a été pratiquée en faisant varier ces entrées autour de valeurs de base définies lors du calage. Le critère statistique utilisé dans cette étude est l'indice de sensibilité (IS) défini par l'équation suivante :

$$IS = \frac{[O_2 - O_1]}{MO_{12}} * \frac{MI_{12}}{[I_2 - I_1]} \quad (2)$$

où I_1 , I_2 et MI_{12} représentent, respectivement, la valeur minimum, maximum et moyenne des entrées du modèle alors que O_1 , O_2 et MO_{12} représentent, respectivement, la valeur minimum, maximum et moyenne des sorties du modèle. L'indice de sensibilité IS donne le rapport entre le changement pondéré des sorties (charge sédimentaire totale) et le changement pondéré des entrées (paramètres et variables du modèle). La sensibilité du modèle CEQÉROSS aux paramètres analysés sera d'autant plus forte que l'indice IS sera élevé. Un indice de sensibilité positif indique que la réponse du modèle varie dans le même sens que la variation du paramètre alors qu'un indice négatif indique le contraire. Cependant, cet indice ne tient pas compte de l'interaction entre les paramètres et suppose que les paramètres sont, *a priori*, indépendants. BAFFAUT *et al.* (1997) ont utilisé un indice similaire pour analyser la sensibilité du modèle d'érosion WEPP (*Water Erosion Prediction Project*, USDA, 1995).

Les paramètres et variables du *tableau 1* ont été utilisés pour analyser la sensibilité du modèle CEQÉROSS à prédire la charge totale annuelle (érosion nette) évacuée à l'exutoire du bassin versant de Lennoxville. L'analyse de sensibilité a porté sur 19 paramètres de calage et 3 variables d'entrée sélectionnés pour leur capacité à influencer l'érosion au sol, l'érosion en rivière et le transport des sédiments ; au sol, ils servent à simuler les processus d'érosion pluviale, d'érosion par ruissellement et de capacité de transport tandis qu'en rivière, ils servent à simuler l'érosion fluviale et le transport des sédiments par tranches granulométriques. Le *tableau 1* donne également les valeurs minimums et maximums nécessaires au calcul de l'indice de sensibilité ainsi que les valeurs des paramètres de calage de CEQÉROSS pour le bassin versant de Lennoxville (DUCHEMIN *et al.*, 2001). Ces valeurs minimums et maximums ont été déterminées à partir de la littérature ou fixées à ± 50 % de la valeur de base obtenue lors du calage. Des erreurs de ± 50 % ont été introduites dans les variables d'érodabilité annuelle moyenne FKAN et de pente moyenne PENTD pour chacun des éléments de calcul du bassin versant. Une erreur de ± 50 % a également été introduite dans les valeurs périodiques du facteur de la végétation FC pour chaque système de gestion agricole du bassin versant.

VIEUX et NEEDHAM (1993) et KIENZLE (1996) ont montré que le degré de définition spatiale utilisé pour segmenter un bassin versant influence la quantité de données à amasser et la qualité des résultats obtenus. À cet effet, le bassin versant de Lennoxville a été soumis à trois découpages différents afin d'évaluer la sensibilité du modèle CEQÉROSS à l'influence de la taille des éléments de calcul. Le découpage de base ayant servi au calage des paramètres de CEQÉ-

ROSS (cf. *tableau 1*) comportait des carreaux de 0,25 ha de résolution (i.e. 50 × 50 m). Cette résolution de base a été modifiée de $\pm 50\%$ afin d'obtenir des carreaux de 1 ha et 0,065 ha. Le paramètre RÉSOLUTION a servi pour déterminer l'influence de la taille des carreaux sur les charges sédimentaires simulées à l'exutoire du bassin versant.

Tableau 1 Paramètres impliqués dans l'analyse de sensibilité du modèle CEQÉROSS.

Table 1 Parameters used in the CEQÉROSS sensitivity analysis.

^a Paramètre	Description	Min	Max	^b Calage
RÉSOLUTION	Taille des carreaux en hectare	0,065	1,000	0,250
FARP1 (es)	Coefficient (saison froide) pour la relation érosivité-précipitation	0,038	0,122	0,107
FARP2 (es)	Coefficient (saison chaude) pour la relation érosivité-précipitation	0,095	0,209	0,183
HPLUIE (es)	Hauteur minimum de pluie nécessaire pour produire l'érosivité (mm)	1,0	15,0	1,00
EXPRP (es)	Exposant pour la relation érosivité-précipitation	1,00	2,20	1,76
COEFAM (es)	Coefficient pour le facteur d'amortissement de l'érosivité	0,00	3,00	0,23
HROISS (es)	Hauteur minimum de ruissellement nécessaire pour produire l'érosivité (mm)	0,1	5,0	0,1
COEFQPT (es)	Coefficient pour le calcul du ruissellement de pointe	1,000	10,00	2,143
EXPQPT (es)	Exposant pour le calcul du ruissellement de pointe	0,500	2,000	1,100
ERAN (es)	Érosivité annuelle moyenne ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	704,65	2011,68	1547,04
FKAN (ves)	Érodabilité annuelle moyenne ($\text{t}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$)	0,0205	0,0616	—
PENTD (ves)	Inclinaison moyenne de la pente au sol (degré)	1,94	5,81	—
FC (ves)	Facteur de la végétation	0,122	0,366	—
FCTS (ts)	Coefficient pour la capacité de transport du ruissellement	0,0023	0,0068	0,0045
PSDS (ts)	Proportion de sédiments disponibles au sol (0-1)	0,00	1,00	0,10
FSSRIV1 (er)	Coefficient (saison froide) pour la production de sédiments en rivière	0,01	1,00	0,20
FSSRIV2 (er)	Coefficient (saison chaude) pour la production de sédiments en rivière	0,01	1,00	0,03
FPUSS1 (er)	Exposant du débit pour le calcul de la production de sédiments en rivière	0,58	1,73	1,15
FPUSS2 (er)	Exposant de la pente pour le calcul de la production de sédiments en rivière	0,39	1,16	0,77
POSS1 (tr)	Proportion des sédiments fins en rivière inférieure à DIAM1 (0-1)	0,00	1,00	0,60
POSS4 (tr)	Proportion des sédiments grossiers en rivière entre DIAM3 et DIAM4 (0-1)	0,00	1,00	0,05
POSSTR (tr)	Proportion maximale des sédiments en rivière exportée lors d'un tranfert (0-1)	0,00	1,00	0,10

^a (es) paramètre impliqué dans l'érosion au sol ; (er) paramètre impliqué dans l'érosion en rivière ; (ts) paramètre impliqué dans le transport au sol ; (tr) paramètre impliqué dans le transport en rivière ; (ves) variable impliquée dans l'érosion au sol.

^b DUCHEMIN *et al.* (2001).

Le paramètre ERAN représente l'érosivité annuelle moyenne des précipitations, c'est-à-dire l'énergie moyenne reçue annuellement au sol. Les coefficients FARP1 et FARP2 permettent de tenir compte de la variation saisonnière de cette érosivité pluviale alors que l'exposant EXPRP détermine le taux de variation de l'érosivité fournie par les précipitations. La hauteur de pluie HPLUIE nécessaire pour induire l'érosion pluviale implique qu'une certaine quantité d'énergie est nécessaire pour déloger les particules du sol (SHARMA *et al.*, 1991) alors que l'érosion par ruissellement devient active lorsqu'une certaine hauteur d'eau au sol HRUISS est atteinte. La présence d'une nappe d'eau sur le sol contribue toutefois à réduire l'érosivité des précipitations en absorbant une partie de l'énergie cinétique des gouttes de pluie (PALMER, 1965 ; KINNELL, 1991). Cette interaction pluie-ruissellement est considérée dans CEQÉROSS par la présence d'un coefficient d'amortissement des précipitations COEFAM qui suppose que l'érosivité pluviale décroît exponentiellement lorsque la lame d'eau ruissellée s'épaissit (cf. Appendice 1, équation 1). Un coefficient similaire est utilisé dans le modèle européen d'érosion des sols EUROSEM (MORGAN *et al.*, 1998). Les quantités de sol érodées et transportées vers l'aval du bassin versant sont limitées par la capacité de transport du ruissellement. Le paramètre FCTS permet d'ajuster le transfert des sédiments au sol entre les carreaux.

Dans CEQÉROSS, la production des sédiments en rivière varie selon la pente et la longueur des tronçons du cours d'eau. Les paramètres FPUSS1 et FPUSS2 déterminent le taux de variation du transport sédimentaire selon ces caractéristiques physiques alors que les paramètres FSSRIV1 et FSSRIV2 conditionnent l'intensité saisonnière de l'érosion en rivière. Les quantités de sédiments transportées en rivière dépendent aussi de la dimension et de la proportion relative des particules en suspension et de la vitesse du courant. Les paramètres POSS1, POSS4 et POSSTR permettent d'ajuster l'érosion et le transport des sédiments en rivière pour différentes classes granulométriques.

3 – RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La figure 2 présente la charge sédimentaire totale (érosion nette) simulée par CEQÉROSS sur le bassin versant de Lennoxville durant la période d'octobre 1991 à septembre 1992. La charge sédimentaire totale simulée à l'exutoire du bassin versant a atteint 27,54 t comparativement à 30,32 t pour la charge sédimentaire observée. L'ajustement des paramètres de calage a donné un coefficient NS (NASH et SUTCLIFF, 1970) de 0,38 et un coefficient de corrélation de Pearson (R) de 0,65 pour l'année hydrologique 1991-1992. Comme en témoigne le synchronisme des pointes journalières, le modèle CEQÉROSS a bien reproduit la dynamique des charges sédimentaires observées à l'exutoire du bassin versant. L'analyse de sensibilité porte sur ces résultats.

L'importance relative des changements survenus dans la charge totale annuelle simulée par le modèle suite aux variations des paramètres d'érosion et de transport au sol et en rivière est exprimée par l'indice de sensibilité (IS) à la figure 3. De façon générale, les paramètres FPUSS1, FPUSS2, FSSRIV1 et FSSRIV2 associés à l'érosion en rivière étaient les plus influents. La variable

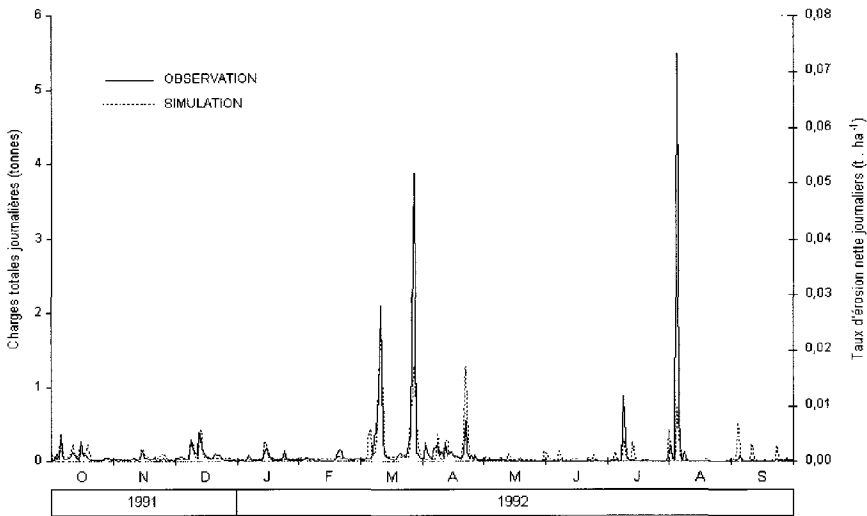


Figure 2 Simulation de l'érosion nette sur le bassin versant de Lennoxville pour la période d'octobre 1991 à septembre 1992.

Simulation of net erosion on the Lennoxville watershed for the period October 1991 to September 1992.

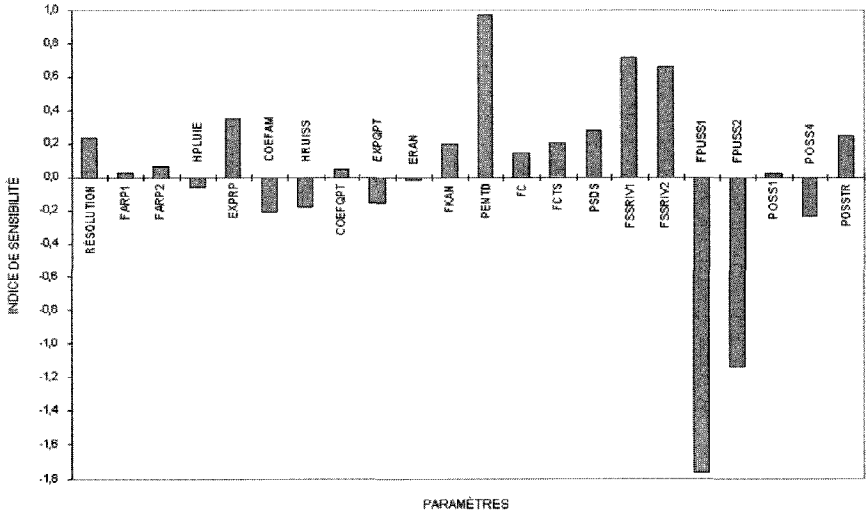


Figure 3 Résultats de l'analyse de sensibilité du modèle CEQÉROSS.

Results of the CEQÉROSS model sensitivity analysis.

d'entrée PENTD et le paramètre de calage EXPRP associés à l'érosion au sol exercent également une influence considérable sur la charge sédimentaire totale annuelle car ils influencent directement l'énergie d'érosion. Quant aux paramètres de calage FARP1, FARP2 et COEFQPT associés à l'érosivité, ils agissent peu sur la charge totale annuelle. Ces résultats suggèrent que la dis-

inction temporelle proposée par le modèle concernant l'érosivité des précipitations associée aux périodes chaude et froide de l'année a peu d'influence sur l'érosion nette simulée à l'exutoire du bassin versant. Il est trop tôt présentement (dans la vie du modèle) pour décider de la fusion de ces deux paramètres en un seul paramètre FARP, mais cette option reste envisageable. Les applications futures de CEQÉROSS permettront de répondre à cette question.

La taille des carreaux (i.e. **RÉSOLUTION**) exerce une influence modérée sur la charge totale annuelle de sédiments en suspension transportée à l'exutoire du bassin versant de Lennoxville. La *figure 4* présente les statistiques descrip-

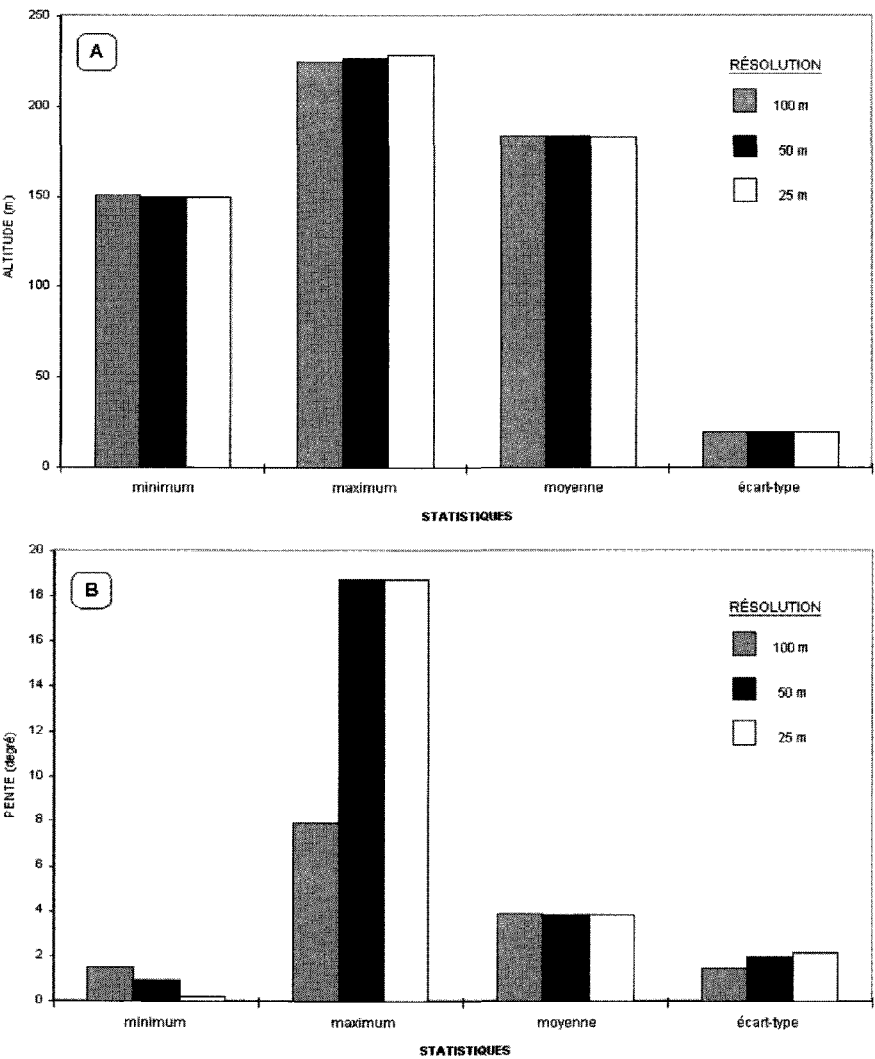


Figure 4 Comparaison entre les caractéristiques topographiques du bassin versant de Lennoxville pour trois résolutions spatiales.
Comparison between topographic characteristics of the Lennoxville watershed for three different spatial resolutions.

tives relatives aux données d'altitudes et de pentes extraites des carreaux de 100 m, 50 m et 25 m de résolution. La similarité des moyennes et des écarts type des altitudes provenant des carreaux suggère que la diminution de la résolution de 25 m à 100 m influence peu la distribution statistique des altitudes à l'échelle du bassin versant (cf. *figure 4a*). Quelle que soit la résolution employée, le coefficient de variation des altitudes s'est maintenu à 10,9 % sur le bassin versant.

Les pentes moyennes PENTD extraites des carreaux de 100 m, 50 m et 25 m étaient similaires alors que les écarts type augmentaient légèrement en fonction de l'augmentation de la résolution (cf. *figure 4b*). Le coefficient de variation des pentes est passé de 38,5 % à 56,3 % lorsque la taille des carreaux passait de 100 m à 25 m. Les statistiques présentent un effet de seuil entre 50 et 100 m sur les pentes fortes. La résolution spatiale utilisée pour segmenter le bassin versant de Lennoxville a modifié les pentes maximums extraites des éléments de calcul, ce qui est déterminant pour le calcul de l'érosion. Une erreur de $\pm 50\%$ dans l'estimation de la pente moyenne PENTD des éléments de calcul du bassin versant influence fortement la charge sédimentaire simulée par le modèle CEQÉROSS, *via* les équations impliquant la topographie et la capacité de transport (cf. Appendice 1, équations 3 et 5). La pente PENTD interagit avec la hauteur du ruissellement H_{ji} pour accroître la capacité de transport au sol T_{sji} . La *figure 5* illustre ce comportement pour le bassin versant de Lennoxville où

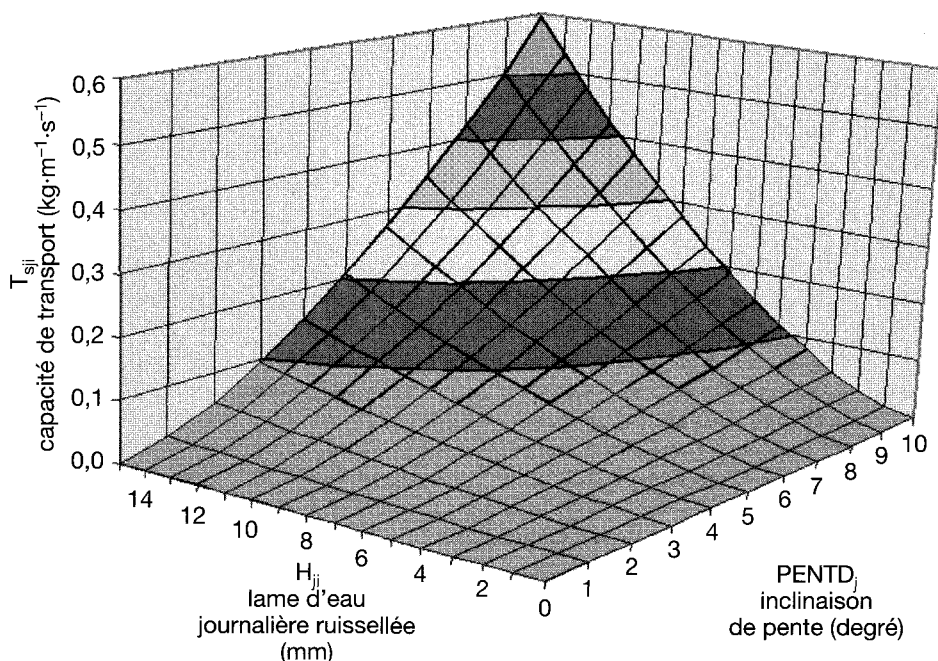


Figure 5 Variation de la capacité de transport journalière au sol en fonction de l'inclinaison de la pente et de la lame d'eau journalière ruissellée sur le bassin versant de Lennoxville.

Variation of the daily transport capacity in function to relief slope and daily runoff for the Lennoxville watershed.

FCTS = 0,0045 (cf. *tableau 1*). Une augmentation de la valeur de PENTD sur un carreau entraîne donc une augmentation de la masse de sédiments transportés vers l'aval de ce carreau. Les paramètres FCTS (cf. Appendice 1, équation 5) et PSDS (cf. Appendice 1, équation 6) associés au transport des sédiments au sol ont une influence directe, mais modérée, sur la charge sédimentaire transportée en rivière.

Au sol, le paramètre d'érosivité pluviale EXPRP exerce une influence directe et importante sur la charge sédimentaire alors que la variation de la réponse du modèle CEQÉROSS s'effectue dans le sens opposé à la variation des paramètres HPLUIE, HRUISS et COEFAM. La hauteur d'eau au sol nécessaire pour induire l'érosivité du ruissellement agit donc plus fortement sur la quantité de sédiments transportés à l'exutoire du bassin versant que la hauteur de pluie nécessaire pour induire l'érosivité des pluies. Quant au paramètre d'érosivité annuelle moyenne ERAN, son influence sur la charge totale annuelle est presque nulle. Selon l'équation 1 (Appendice 1), l'érosivité des précipitations journalières (R_{pji}) croît rapidement lorsque les quantités de pluie (P_{ji}) augmentent, et ce, d'autant plus que l'exposant EXPRP et le coefficient FARP (i.e. FARP1 et FARP2) est élevé. La faible influence du paramètre FARP1 serait attribuable à la présence de neige au sol qui annule l'érosivité pluviale durant une bonne partie de l'année sur le bassin versant.

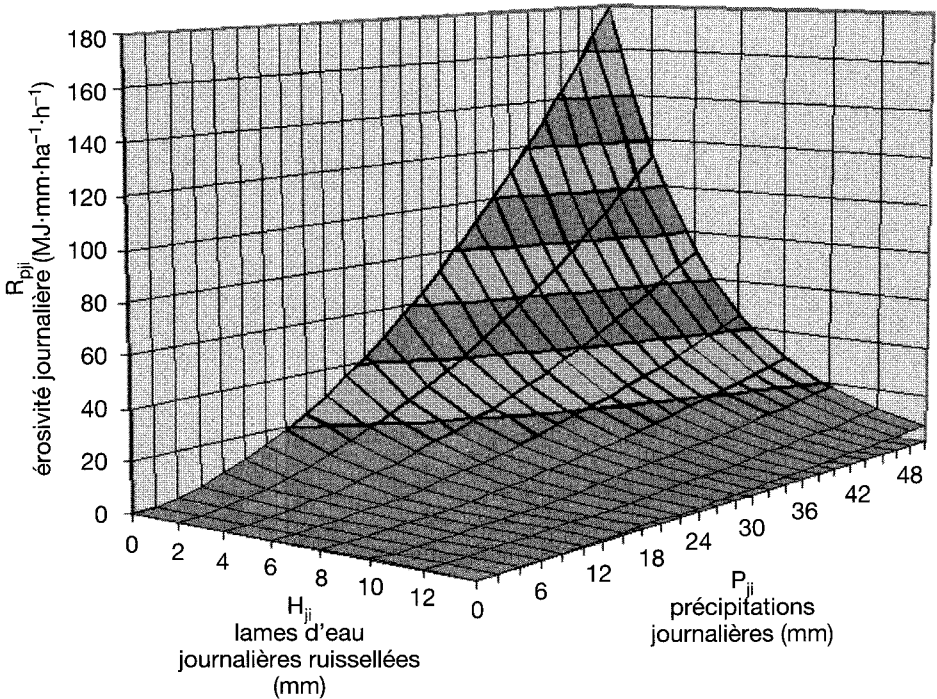


Figure 6 Variation de l'érosivité journalière des précipitations en fonction des précipitations et des lames d'eau journalières ruissellées sur le bassin versant de Lennoxville.

Variation of the daily rainfall erosivity in function to daily rainfall and runoff for the Lennoxville watershed.

La figure 6 illustre la façon dont l'érosivité des précipitations journalières (R_{pji}) varie en fonction inverse de la hauteur des lames d'eau ruissellées (H_{ji}) et en fonction directe des quantités de pluie reçues (P_{ji}) pour le calage effectué à Lennoxville où $FARP = 0,183$, $EXPRP = 1,76$ et $COEFAM = 0,23$ (cf. *tableau 1*). L'ajustement du coefficient d'amortissement $COEFAM$ permet de gérer l'effet combiné de la pluie et du ruissellement sur l'érosion pluviale. Une augmentation de la valeur du paramètre $COEFAM$ entraîne une diminution considérable de l'impact érosif des précipitations au sol. L'indice de sensibilité des paramètres de calage associés à l'érosivité du ruissellement (R_{rji}) montre qu'une augmentation du paramètre $EXPQPT$ (cf. Appendice 1, équation 1) réduit la charge sédimentaire annuelle simulée par CEQÉROSS. La figure 7 illustre la façon dont l'érosivité du ruissellement journalier (R_{rji}) varie en fonction de la hauteur des lames d'eau ruissellées (H_{ji}) et des débits moyens journaliers (Q_{mji}) pour le calage effectué à Lennoxville où $S_i = 78$ ha, $COEFQPT = 2,143$ et $EXPQPT = 1,100$. L'érosivité du ruissellement est beaucoup moins importante que celle des précipitations. Si l'énergie du ruissellement de surface s'avère moins efficace pour éroder les particules du sol, elle demeure cependant plus efficace pour transporter les particules en suspension (MORGAN 1986). Il faut toutefois rappeler que les conditions agroclimatiques de la période d'octobre 1991 à septembre 1992 favorisaient peu l'érosion hydrique.

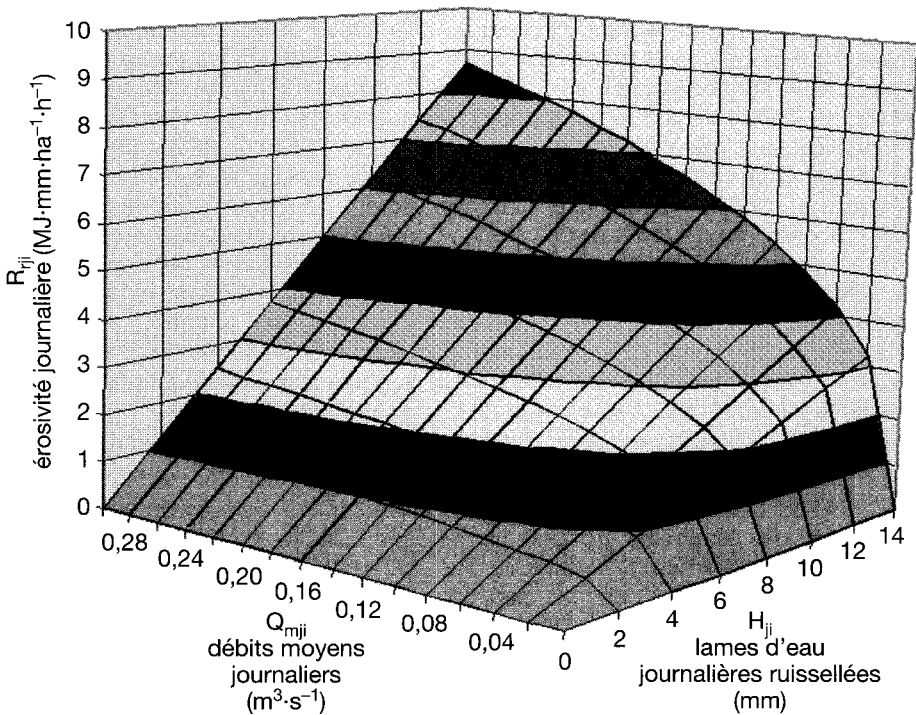


Figure 7

Variation de l'érosivité journalière du ruissellement en fonction des débits moyens et des lames d'eau journalières ruissellées sur le bassin versant de Lennoxville.

Variation of the daily runoff erosivity in function to daily flow rate and runoff for the Lennoxville watershed.

fectuer avec prudence. Aussi, l'application de CEQÉROSS à d'autres bassins versants permettra de raffiner ses équations et d'étudier ses réponses pour différentes conditions agroclimatiques.

APPENDICE 1

Principales équations du modèle CEQÉROSS.

APPENDIX 1

Equations used in the CEQÉROSS model.

$$\begin{aligned}
 R_{tji} &= R_{pji} + R_{rji} \\
 R_{pji} &= 0,646 \left[\left(FARP P_{ji}^{EXPRP} \right) e^{-(COEFAM H_{ji})} \right] \\
 R_{rji} &= 0,45 \left[H_{ji} \left(360 \left(\frac{COEFQPT Q_{mji}^{EXPQT}}{S_i} \right) \right)^{0,33} \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

R_{tji} = érosivité totale journalière sur l'élément de calcul i (MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹)

R_{pji} = érosivité des précipitations sur l'élément de calcul i (MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹)

R_{rji} = érosivité du ruissellement sur l'élément de calcul i (MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹)

P_{ji} = précipitation journalière sur l'élément de calcul i (mm)

H_{ji} = lame d'eau journalière ruissellée sur l'élément de calcul i (mm)

Q_{mji} = débit moyen journalier sur l'élément de calcul i (m³·s⁻¹)

S_i = superficie de l'élément de calcul i (ha)

$FARP$, $EXPRP$ = coefficients de calage pour l'érosivité pluviale

$COEFAM$ = coefficient de calage pour amortir l'érosivité pluviale

$COEFQPT$, $EXPQT$ = coefficients de calage pour l'érosivité du ruissellement

$$FKAN_i = \sum_{s=1}^n (\%_{si}) K_{as} \tag{2}$$

$FKAN_i$ = érodabilité annuelle moyenne, pondérée sur l'élément de calcul i (t·ha·h·MJ⁻¹·ha⁻¹·mm⁻¹)

K_{as} = érodabilité annuelle moyenne de la série de sol (s) (t·ha·h·MJ⁻¹·ha⁻¹·mm⁻¹)

$\%_{si}$ = % de l'élément de calcul i couvert par la série de sol (s)

n = nombre de séries de sols (s) sur l'élément de calcul i

$$\begin{aligned}
 LS_i &= \left(\frac{I_i}{22,13} \right)^{m_i} \left[-1,5 + \frac{17}{1 + \exp(2,3 - 6,1 \sin PENTD_i)} \right] \\
 m_i &= \frac{\frac{0,0896}{3 \sin^{0,8} PENTD_i + 0,56}}{\sin PENTD_i} \\
 &\quad \frac{1 + \frac{0,0896}{3 \sin^{0,8} PENTD_i + 0,56}}{\sin PENTD_i}
 \end{aligned} \tag{3}$$

LS_i = facteur topographique sur l'élément de calcul i

I_i = longueur de pente sur l'élément de calcul i (m)

$PENTD_i$ = inclinaison de la pente du terrain sur l'élément de calcul i (degré)

$$FC_{ij} = C_{pn} + \left(C_{p(n+1)} - C_{pn} \right) * \frac{(JO - JD_n)}{(JD_{(n+1)} - JD_n)} \quad (4)$$

FC_{ij} = valeur du facteur C sur l'élément de calcul i au jour (j)

C_{pn} = facteur C au début de la n^e période

n = période « végétale » (1 à 5)

JO = jour julien à évaluer (1 à 365 ou 366)

JD_n = jour julien du début de la n^e période

$$T_{sji} = FCTS \left[\rho_w g \left(\frac{H_{ji}}{1000} \right) * \tan PENTD_i \right]^{1,5} \quad (5)$$

T_{sji} = capacité de transport au sol sur l'élément de calcul i ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

FCTS = coefficient de transport (à calibrer) ($\text{m}^{0,5} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-0,5}$)

ρ_w = densité de l'eau ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) [999,1 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à 15° C]

g = accélération gravitationnelle ($9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

H_{ji} = lame d'eau journalière ruissellée sur l'élément de calcul i (mm)

PENTD_i = pente sur l'élément de calcul i (degré)

$$PROSOL_{ji} = (P_{sji} - P_{stji}) PSDS \quad (6)$$

PROSOL_{ji} = masse journalière de sédiments retenue sur l'élément i ($\text{t} \cdot \text{jour}^{-1}$)

P_{sji} = masse journalière de sédiments produite au sol sur l'élément i ($\text{t} \cdot \text{jour}^{-1}$)

P_{stji} = masse journalière de sédiments transférée vers l'aval ($\text{t} \cdot \text{jour}^{-1}$)

PSDS = proportion de sédiments disponibles au sol pour le prochain transport

$$P_{rji} = FSSRIV (Q_{mji})^{FPUSS1} (S_{ri})^{FPUSS2} (L_{ri}) \quad (7)$$

P_{rji} = production journalière de sédiments en rivière sur l'élément i ($\text{t} \cdot \text{jour}^{-1}$)

Q_{mji} = débit moyen journalier sur l'élément i ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

S_{ri} = pente moyenne de la rivière sur l'élément i ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)

L_{ri} = longueur du cours d'eau sur l'élément i (m)

FSSRIV = coefficient de calibration de la production en rivière

FPUSS1 = coefficient de calibration de la puissance du débit en rivière

FPUSS2 = coefficient de calibration de la puissance de la pente en rivière

$$P_n = POSSTR \left[\frac{(V_{ri} - vc_{n-1})}{(vc_n - vc_{n-1})} \right] \quad (8)$$

P_n = paramètre d'amortissement pour la classe granulométrique « n » modifié en fonction de la vitesse de chute des particules

POSSTR = paramètre d'amortissement de l'érosion en rivière (i.e. proportion maximale de sédiments en suspension des classes granulométriques 2, 3 et 4 exportée au carreau aval pendant un transfert)

V_{ri} = vitesse du courant d'eau en rivière sur l'élément ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

vc_n = vitesse de chute correspondant au diamètre maximum de la classe granulométrique « n » ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAFFAUT C., NEARING M.A., ASCOUGH J.C., LIU B., 1997. The WEPP Watershed Model: II. Sensitivity Analysis and Discretization on Small Watersheds. *Transactions of the ASAE*, 40 (4), 935-943.
- BERNARD C., 1990. *Contrôle de l'érosion hydrique des sols et de la pollution diffuse*, Guide technique de conservation des ressources, Fiche technique n° 4, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 15 pages + logiciel.
- DUCHEMIN M., LACHANCE M., MORIN G., LAGACÉ R., 2001. Approche géomatique pour simuler l'érosion hydrique et le transport des sédiments à l'échelle des petits bassins versants. *Water Qual. Res. J. Canada*, 36 (3), 435-473.
- EASTMAN R.J., 1997. *IDRISI for Windows, Users Guide, Version 2.0*, Clark University, Graduate School of Geography, Worcester, MA, U.S.A.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1993. Normales climatiques au Canada (1961-1990) : Québec. Publication du Programme climatologique canadien, Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique.
- FERREIRA V.A., WEESIES G.A., YODER D.C., FOSTER G.R., RENARD K.G., 1995. The site and condition specific nature of sensitivity analysis. *J. Soil Water Conserv.*, 50 (5), 493-497.
- FINKNER S.C., NEARING M.A., FOSTER G.R., GILLEY J.E., 1989. A Simplified Equation for Modeling Sediment Transport Capacity. *Transactions of the ASAE*, 32, 1545-1550.
- GANGBAZO G., CLUIS D., BERNARD C., 1994. Contrôle de la pollution diffuse agricole à l'échelle du bassin versant. *Sci. Tech. Eau*, 27, 33-39.
- KIENZLE S.W., 1996. Using DTMs and GIS to define input variables for hydrological and geomorphological analysis. In: *HydroGIS 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, Proceedings of the Vienna Conference, April 1996, IAHS, 235, 183-190.
- KINNELL P.I.A., 1991. The Effect of Flow Depth on Sediment Transport Induced by Raindrops Impacting Shallow Flows. *Transactions of the ASAE*, 34 (1), 161-168.
- LAGACÉ R., 1980. L'Équation universelle de perte de sols : un outil. In : *Érosion et conservation des sols*, 8^e Colloque de Génie rural, Département de génie rural, Université Laval, Robert Lagacé (éd.), 37-60.
- MCCUEN R.H., SNYDER W.M., 1986. *Hydrologic Modeling: Statistical Methods and Applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 568 pp.
- MEIER W.L., WEISS A.G., PUENTES C.D., MOSELEY J.C., 1971. Sensitivity analysis: a necessity in water planning. *Water Resour. Bull.*, 7 (3), 529-541.
- MORGAN R.P.C., 1986. *Soil Erosion and Conservation*. Longman Scientific & Technical, Longman Group UK Limited.
- MORGAN R.P.C., QUINTON J.N., SMITH R.E., GOVERS G., POESEN J.W.A., AUERSWALD K., CHISI G., TORRI D., STYCZEN M.E., FOLLY A.J.V., 1998. *The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide*, Version 3.6, July 1998. Silsoe College, Cranfield University, United Kingdom, 89 p. + 10 annexes.
- MORIN G., PAQUET P., SOCHANSKI W., 1995. Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU, Guide de l'utilisateur, Version 2.0 pour DOS. INRS-Eau, Ste-Foy, Québec, Canada, *Rapport de recherche n° 434*, 44 p.
- NASH J.E., SUTCLIFFE J.V., 1970. Riverflow Forecasting Through Conceptual Model. *J. Hydrol.*, 10, 282-291.
- NEARING M.A., DEER-ASCOUGH L., LAFLEN J.M., 1990. Sensitivity Analysis of the WEPP Hillslope Profile Erosion Model. *Transactions of the ASAE*, 33 (3), 839-849.
- PALMER R.S., 1965. Waterdrop impact forces. *Transactions of the ASAE*, 8 (1), 69-70, 72.
- RENARD K.G., MCCOOL D.K., YODER D.C., 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation*

- (RUSLE). Agricultural Handbook 703, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington D.C., 404 p.
- RICHARDSON C.W., FOSTER G.R., WRIGHT D.A., 1983. Estimation of Erosion Index from Daily Rainfall Amount. *Transaction of the ASAE*, 26 (1), 153-157.
- ROBERT C., BANTON O., LAFRANCE P., VILLENEUVE J.-P., 1992. Analyse de sensibilité paramétrique d'un modèle simulant le transport de pesticide dans le sol. *Revue des Sciences de l'Eau*, 5 (2), 197-210.
- SHARMA P.P., GUPTA S.C., RAWLS W.J., 1991. Soil Detachment by Single Raindrops of Varying Kinetic Energy. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 301-307.
- USDA, 1995. *Water Erosion Prediction Project: WEPP technical documentation*, United States Department of Agriculture (USDA), NSERL Report no.10, July 1995, National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-ARS-MWA, 1196 SOIL Building West Lafayette, 131 p.
- VIEUX B.E., NEEDHAM S., 1993. Nonpoint-Pollution Model Sensitivity to Grid-Cell Size. *J. Water Res. Pl.*, 119 (2), 141-157.
- VILLENEUVE J.P., HUBERT P., MAILHOT A., ROUSSEAU A.N., 1998. La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. *Rev. Sci. Eau*, 11, 19-39.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A guide to conservation planning*. Agricultural Handbook 537, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., 58 p.
- YOUNG R.A., ROMKENS M.J.M., McCOOL D.K., 1990. Temporal Variations in Soil Erodibility. *Catena Supplement*, 17, 41-53.